# 보정된 Scatterometer의 측정데이터를 사용한 SAR 데이터 교정

# SAR Data Correction Based on Calibrated-Scatterometer Measurements

정 구 준 · 홍 진 영 · 오 이 석

Goo-Jun Jung · Jin-Young Hong · Yi-Sok Oh

## 요 약

본 논문에서는 calibration된 scatterometer를 이용하여 SAR 데이터를 보정하는 연구 결과를 선보인다. 도체구를 이용하여 안테나 주빔에서의 polarimetric한 안테나 패턴(크기와 위상)을 측정하고, 이 데이터를 이용하여 차량 탑재형 네트워크 분석기형 scatterometer 시스템을 polarimetric하게 정확하게 보정하였다. 이 scatterometer를 이용하면 잔디밭, 논, 맨땅 등의 지표면에 대한 정확한 Mueller 행렬을 얻을 수 있으므로, 레이더 산란계수뿐만 아니라 위상변수들도 정확하게 측정하게 된다. 또한, 대부분의 SAR 시스템에는 위상변수 측정에 에러가 있게 되고, polarimetric하게 보정된 scatterometer로 SAR가 측정하는 지역을 동시에 측정하여 SAR 데이터를 교정할 수 있다. 이러한 polarimetric한 보정 방법을 이용하면, 산란계수의 보정효과는 크지 않으나, hh-편파와 vv-편파간의 위상변수인 degree of correlation $\alpha$의 보정효과는 매우 큼을 알 수 있었다.

## Abstract

This paper presents an SAR-data calibration technique using a well-calibrated scatterometer. At first, a fully-polarimetric antenna pattern(magnitude and phase) of the antenna main-beam using a conducting sphere was measured. Then, this data were used to calibrate polarimetrically an auto-mounted network analyzer-based scatterometer system. This scatterometer system can be used to measure the accurate Mueller matrices of earth surfaces such as grass fields, rice fields and bare soil surfaces; i.e., the phase-difference parameters can be obtained as well as the radar scattering coefficients. If a polarimetrically calibrated scatterometer is operated at the same time with the SAR system, the scatterometer data can be used to correct the SAR data, especially the phase-difference parameters. It was found that the correction effect is remarkable for the degree of correlation $\alpha$, which is one of the phase-difference parameter, while the correction effect is negligible for the magnitude parameters(backscattering coefficients).

Key words : Mueller Matrix, Phase-Difference Parameters, Polarimetric Calibration

## Ⅰ. 서 론

전 편파(Full-polarimetric) 레이더 시스템의 보정에 관한 주제는 많은 사람들에 의해 연구되어져 왔다[1].

특히 마이크로파 원격탐사의 분야에서 정확히 보정된 시스템에 의한 측정이 정확한 모델링 및 정량적 지표면 변수 추출 알고리듬에 중요한 역할을 한다. 이에 따라 시스템을 구성하는 능동소자와 안테나의 편파별 채널간 간섭에 의해 발생하는 왜곡을 제거하는 것이 필요하고 또 그에 관한 기술 보정이 필요하게 되었다[2].

많은 사람들에 의해 보정의 기술이 연구되어 왔으나 이는 많은 산란체들로 구성되어 있는 분포목표물(distributed targets)에 대한 것이 아니라 하나의 산

「이 연구는 정보통신기초기술연구지원사업(정보통신연구진흥원)의 지원으로 연구되었음.」

홍익대학교 전파통신공학과(Department of Radio Science & Communication Engineering, Hongik University)

· 논 문 번 호 : 20031115-01S

· 수정완료일자 : 2004년 1월 3일

란자로 구성되어 있는 점목표물(point targets)에 관한 것이었다[3]. 즉, 레이더 응답 값을 알고 있는 점목표물의 값을 분포목표물과 등가로 놓고 보정하는 방식이었다. 이 방식은 근사 정도가 심하여 분포 목표물에 대한 보정에 있어서 그 정확성에 의심을 받아왔다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 근사를 최소화할 수 있는 정확한 보정기술을 소개하려 한다. 또한 기존의 방식들은 측정된 값의 크기에 대해서만 보정이 이루어지지만 본 논문에서는 그 위상의 변화에 대한 부분도 함께 보정의 과정에 포함하여 보정한다.

JPL/AirSAR의 측정데이터에는 위상 에러성분이 발생될 수 있고 그 데이터의 정확성에 문제가 발생한다[3],[4]. 그러므로 보정된 scatterometer의 데이터의 위상정보를 SAR의 그것과 비교하여 SAR영상 데이터의 교정이 필요하게 된다. 본 논문에서는 정확히 보정된 Scatterometer에 의해 측정된 데이터를 활용하여 SAR 데이터를 보정하는 방법을 소개한다.

## Ⅱ. 이론적 배경

지표면은 확률적으로 균일한 성질을 갖는 불규칙한 매질로 간주할 수 있다. 레이더 산란 측정에 있어서 관심 있는 양은 단위 면적당의 산란 전계에 대한 통계적인 성질인 산란계수 $\sigma^0$이고 이것은 다음과 같이 정의할 수 있다[5].

$$\sigma^0 = \lim_{r\to\infty}\lim_{A\to\infty}\frac{4\pi r^2}{A}\frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \tag{1}$$

여기서 $E^i$, $E^s$는 각각 입사된 전계와 산란된 전계를 나타내고 A는 안테나 빔이 조사된 영역을 나타내며 $r$은 관찰지점과 목표 지면과의 거리를 나타낸다. 위의 정의는 지면이 평면파에 의해 조사되었다는 가정하에 정의된 것이다.

전 편파 레이더 시스템의 안테나 빔에 의해 조사된 평면의 분포목표물 지역을 가정하면 그림 1과 같다.

여기서 OMT(Orthogonal Mode Transducer)는 자체 제작한 것으로 안테나와 일체형으로 되어 있고 scatterometer 측정 시에 사용되었다[6]. 안테나 빔이 조사된 영역을 유한개의 픽셀을 가지는 영역으로 나누고 $ij$ 위치에 있는 픽셀의 산란 행렬을 $\Delta\overline{\overline{S}}(x_i, y_j)$로 놓는다.

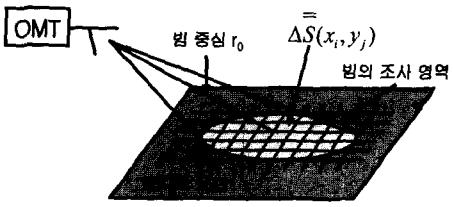



그림 1. 불규칙한 균질매질 평면으로 조사되는 안테나 빔과 각 픽셀들

Fig. 1. The antenna beam that is illuminating to the randomly distributed plane surface and the subdivided area.

이상적이지 않은 레이더 시스템과 안테나에 의해 측정된 산란행렬($\overline{\overline{U}}$)과 점목표물의 산란행렬($\overline{\overline{S}}$)의 관계식은 같이 된다.

$$\overline{\overline{U}} = \frac{e^{2ik_0r}}{r^2}\overline{\overline{R}}\,\overline{\overline{S}}\,\overline{\overline{T}} \tag{2}$$

여기서 $\overline{\overline{R}}$, $\overline{\overline{T}}$는 각각 수신과 송신의 2×2 왜곡행렬이다. 또한, $ij$번째 픽셀에 대해 측정된 미분형 산란 행렬인 $\Delta\overline{\overline{T}}$는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\overline{\overline{U}} = \frac{e^{2ik_0r(x_i,y_j)}}{r^2(x_i,y_j)}\overline{\overline{R}}(x_i,y_j) \cdot \begin{bmatrix} \Delta S_{vv}(x_i,y_j) & \Delta S_{vh}(x_i,y_j) \\ \Delta S_{hv}(x_i,y_j) & \Delta S_{hh}(x_i,y_j) \end{bmatrix}\overline{\overline{T}}(x_i,y_j) \tag{3}$$

안테나 빔이 조사된 영역내의 모든 픽셀로부터의 후방산란 전계의 합은 다음과 같다.

$$\overline{\overline{U}} = \sum_i\sum_j \frac{e^{2ik_0r(x_i,y_j)}}{r^2(x_i,y_j)}\overline{\overline{R}}(x_i,y_j) \cdot \Delta\overline{\overline{S}}(x_i,y_j)\,\overline{\overline{T}}(x_i,y_j) \tag{4}$$

미분형 Mueller 행렬을 구하기 위한 상관행렬은 다음과 같다[5].

$$\overline{\overline{W^0}} = \begin{bmatrix} S^{0*}_{vv}S^0_{vv} & S^{0*}_{vh}S^0_{vh} & S^{0*}_{vh}S^0_{vv} & S^{0*}_{vv}S^0_{vh} \\ S^{0*}_{hv}S^0_{hv} & S^{0*}_{hh}S^0_{hh} & S^{0*}_{hh}S^0_{hv} & S^{0*}_{hv}S^0_{hh} \\ S^{0*}_{hv}S^0_{vv} & S^{0*}_{hh}S^0_{vh} & S^{0*}_{hh}S^0_{vv} & S^{0*}_{hv}S^0_{vh} \\ S^{0*}_{vv}S^0_{hv} & S^{0*}_{vh}S^0_{hh} & S^{0*}_{vh}S^0_{hv} & S^{0*}_{vv}S^0_{hh} \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서 $S^{0*}_{pq}S^0_{st} = \lim_{\Delta A\to 0}\frac{\Delta S^*_{pq}\Delta S_{st}}{\Delta A}$ 이다.

식 (4)를 간단히 하기 위해 2×2 행렬을 이에 대응

하는 4개 성분의 벡터로 변환하여 사용하게 된다[2]. 여기서 다시 목표가 통계적으로 균일한 물질로 구성되어 있으므로, $\Delta S_l \Delta S_l^*$는 조사된 영역에서 위치의 함수가 아니다. 그러므로 분포목표물에서 측정된 산란 행렬의 covariance 행렬의 각 요소들은 [2]에서와 같이 다음처럼 구할 수 있다.

$$\langle U_m U_n^* \rangle = \sum_{l=1}^{4}\sum_{p=1}^{4}\left[\int\int_A \frac{1}{r^4(x,y)} D_{ml}(x,y) \cdot D_{np}^*(x,y)dxdy\right]\langle S_l^0 S_p^{0*}\rangle \quad (6)$$

여기서,

$X_i = S_l^0 S_p^{0*}$, $i=4(l-1)+p$ 로 나타내고 식
$Y_j = U_m U_n^*$, $j=4(m-1)+n$
(6)을 다시 행렬식으로 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\overline{Y} = \overline{\overline{B}}\,\overline{X} \quad (7)$$

여기서 $\overline{\overline{B}}$의 $ij$번째 요소는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b_{ij} = \int\int_A \frac{1}{r^4(x,y)} D_{ml}(x,y) D_{np}^*(x,y)dxdy \quad (8)$$

여기서 $i=4(l-1)+p$, $j=4(m-1)+n$이다. 미분형 Mueller 행렬은 구성요소가 상관벡터의 구성요소인 다음의 상관행렬 $\overline{\overline{W^0}}$로부터 구해질 수 있다.

$$\overline{\overline{W^0}} = \begin{bmatrix} X_1 & X_6 & X_2 & X_5 \\ X_{11} & X_{16} & X_{12} & X_{15} \\ X_3 & X_8 & X_4 & X_7 \\ X_9 & X_{14} & X_{10} & X_{13} \end{bmatrix} \quad (9)$$

## Ⅲ. 보정 과정

$\overline{\overline{B}}$ 행렬을 구하기 위해서는 안테나 시스템의 주빔의 영역에 걸친 왜곡 행렬을 알아야 한다. 그 뒤 보정 $\overline{\overline{D}}(x_i, y_j)$ 행렬을 알아낸 후 상관벡터 X를 구해낼 수 있다.

참고문헌 [2]에서 송신과 수신 왜곡 요소들은 다음에 수식과 같이 주어질 수 있다.

$$R_{vv}T_{vv} = r_0^2 e^{-2ik_0 r_0}\frac{U_{vv}^s}{(1+C^2)\sqrt{\sigma^s/4\pi}}$$

$$\beta = \frac{R_{hh}}{R_{vv}} = \frac{2C}{(1+C^2)}\frac{U_{hh}^s}{U_{vh}^s}$$

$$\alpha = \frac{T_{hh}}{T_{vv}} = \frac{1+C^2}{2C}\frac{U_{vh}^s}{U_{vv}^s}$$

$$C = \pm\frac{1}{\sqrt{a}}(1-\sqrt{1-a}) \quad (10)$$

여기서, $a = \dfrac{U_{vh}^s U_{hv}^s}{U_{vv}^s U_{hh}^s}$ 이다.

여기서, $\overline{\overline{U^s}}$는 특정한 방향인 $(\phi, \xi)$에서 보정되지 않은 구의 측정값을 나타낸다.

식 (10)에서 주어진 값들로 보정 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\overline{\overline{D}}(x,y) = R_{vv}T_{vv}\begin{bmatrix} 1 & C\alpha & C & C^2\alpha \\ C & \alpha & C^2 & C\alpha \\ C\beta & C^2\alpha\beta & \beta & C\alpha\beta \\ C^2\beta & C\alpha\beta & C\beta & \alpha\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

측정 현장에서 우리는 능동 디바이스 변화에 의한 에러를 보정하기 위해서 오직 빔 중심에서의 구의 응답 값만을 측정하면 된다. 빔 중심의 현장측정값에 의해 보정된 값들에 프라임을 붙여서 (11)로 계산하면 필드에서의 측정값은 다음과 같다.

$$\tilde{r}_v \tilde{t}_v = \left(\frac{r_0'}{r_0}\right)^2 e^{2ik_0(r_0'-r_0)}\frac{R_{vv}'(0,0)T_{vv}'(0,0)}{R_{vv}(0,0)T_{vv}(0,0)}$$

$$\frac{\tilde{t}_h}{\tilde{t}_v} = \frac{T_{hh}'(0,0)}{T_{vv}'(0,0)}\frac{T_{vv}(0,0)}{T_{hh}(0,0)}$$

$$\frac{\tilde{r}_h}{\tilde{r}_v} = \frac{R_{hh}'(0,0)}{R_{vv}'(0,0)}\frac{R_{vv}(0,0)}{R_{hh}(0,0)} \quad (12)$$

식 (12)의 $R_{vv}T_{vv}$, $\alpha$, $\beta$를 $R_{vv}'T_{vv}'$, $\alpha'$, $\beta'$로 다음의 관계식과 같이 바꾸어주면 임의 방향의 보정행렬 ($\overline{\overline{D}}'(\phi,\xi)$)도 구해낼 수 있다.

$$R_{vv}'T_{vv}' = \tilde{r}_v\tilde{t}_v R_{vv}T_{vv},\quad \alpha' = \frac{\tilde{t}_h}{\tilde{t}_v}\alpha,$$

$$\beta' = \frac{\tilde{r}_h}{\tilde{r}_v}\beta. \quad (13)$$

모든 부분 픽셀에 대한 보정행렬을 구해낸 뒤 식 (8)에 주어진 상관 보정 행렬($\overline{\overline{B}}$)를 구해낼 수 있다. 방위각과 앙각 좌표에서의 상관 보정 행렬은 다음의 형태를 갖는다.

$$b_{ij} = \int\int_\Omega D_{ml}(\phi,\xi)D_{np}^*(\phi,\xi)\frac{\cos^2\psi\cos(\theta_0+\xi)}{h^2}d\psi d\xi \quad (14)$$

구해진 정확한 Muller 행렬의 값과 JPL/AirSAR에서의 Muller 행렬을 서로 비교하여 그 차이를 구해내고 이를 사용하여 전체 AirSAR 데이터를 보정하는 과정이 필요하다. 또한 후방산란계수의 크기뿐만 아니라 위상에 대한 차이를 비교하기 위해 $\alpha$와 $\zeta$를 정의하면 위상차의 pdf(probability density function)는 참고문헌 [7]에서 정의된 다음의 두 값으로 나타낼 수 있다. 여기서 $\alpha$는 degree of correlation이고, $\zeta$는 co-polarized phase difference이다. 이 변수들은 hh-편파와 vv-편파의 위상 차이에 대한 위상변수들이다.

$$\alpha = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{(M_{33}+M_{44})^2+(M_{34}-M_{43})^2}{M_{11}M_{22}}} \tag{15}$$

$$\zeta = \tan^{-1}\left(\frac{M_{34}-M_{43}}{M_{33}+M_{44}}\right) \tag{16}$$

## Ⅳ. 보정 실행 결과 및 비교

그림 2는 보정 실행의 과정을 보여주는 흐름도이다. Chamber에서의 구 측정데이터와 측정 지역에서의 구 측정데이터 그리고 이론적인 구의 데이터를 사용하여 보정행렬($\overline{\overline{D}}$)를 구해내고 이를 사용하여 상관보정행렬($\overline{\overline{B}}$)를 구해낸 후 측정하고자 하는 지역의 측정데이터($\overline{\overline{U}}$)를 사용하여 ($\overline{\overline{Y}}$)를 구해내고 그 후 Muller($\overline{\overline{M}}^0$) 행렬로부터 후방산란계수($\sigma^0$)를 구해내면 된다.

그림 3은 Chamber 내에서 구의 응답 특성을 측정하기 위한 장비의 구성도이다.

측정지역의 데이터는 차량 탑재형 C-밴드(5.3 GHz) OMT 장착 scatterometer를 사용하여 논, 잔디밭, 맨땅 지표면의 각 편파 응답을 측정하였다. Chamber에서의 구의 측정은 C-밴드에서 빔의 중심에서의 앙(고)

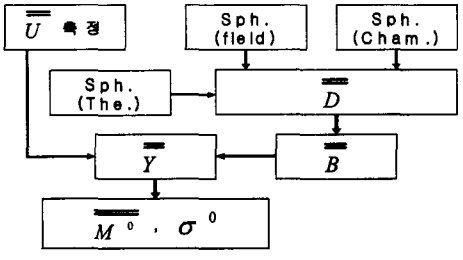



그림 2. 보정실행 과정 흐름도
Fig. 2. Flow chart for the calibration procedure.

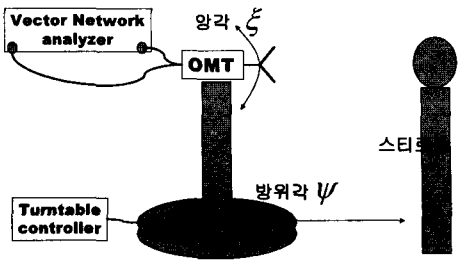



그림 3. 안테나 Polarimetric 패턴 측정
Fig. 3. Measurement of the antenna polarimetric pattern.

각과 방위각을 각각 ±10.5° 범위에서 1.5°의 간격으로 측정되었다.

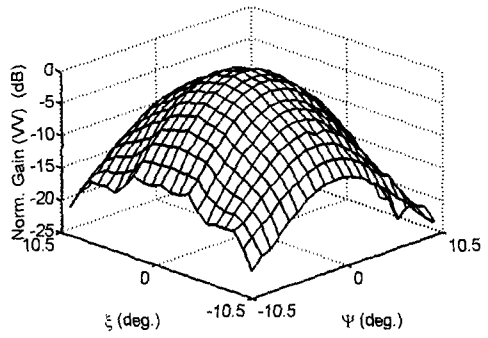
그림 4는 Chamber내에서 측정한 구의 표준화된 이득 패턴과 동일 편파의 위상차와 교차 편파의 위상차를 안테나의 주 빔 내에서 나타낸 그래프이다.

표 1에서는 입사각에 따른 Scatterometer의 보정된 측정값과 SAR데이터의 같은 종류의 데이터 지역에서의 위상 차이를 보여주고 있다. SAR 데이터의 위상 변수(degree of correlation) 값이 더 작으므로 SAR에 이 값들을 더해줌으로써 SAR 데이터를 보정할 수 있다. 이 위상 변수(degree of correlation)는 hh-편파와 vv-편파간 위상 차이를 random 변수로 하여 $N$ 측정 samples에서 pdf를 구하고 표준편차의 크기를 정량화한 변수이다[7]. 예를 들면, 0도에서는 hh-편파와 vv-편파 측정 위상 값이 같으므로 degree of correlation 값은 1이 된다. 이 측정값이 scatterometer에서 SAR보다 높은 것은 scatterometer는 위상차까지 보정되었지만, SAR 시스템의 위상차는 보정이 안되어 있다는 증거가 된다.

표 2에서는 같은 지역의 후방산란계수에 대한 비교이다. 후방산란계수는 이 경우 논 60°를 제외한 경우 약 1 dB 내의 오차 밖에는 없다는 것을 보이고

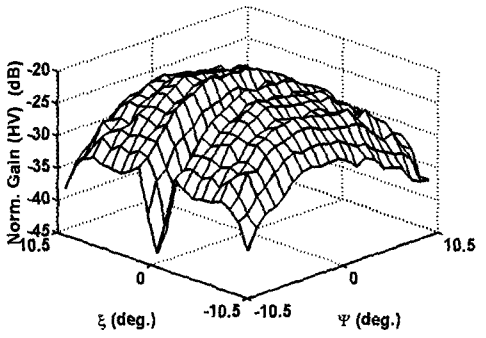
표 1. Degree of correlation 비교
Table 1. Degree of correlation comparison.

| 구 분 | 입사각 | $\alpha$ 측정값 | | 차이 |
|---|---|---|---|---|
| | | Scatt. | SAR | |
| 맨땅 | 40° | 0.48 | 0.13 | 0.35 |
| 논 | 50° | 0.41 | 0.15 | 0.26 |
| | 60° | 0.39 | 0.13 | 0.26 |
| 잔디 | 50° | 0.23 | 0.18 | 0.05 |



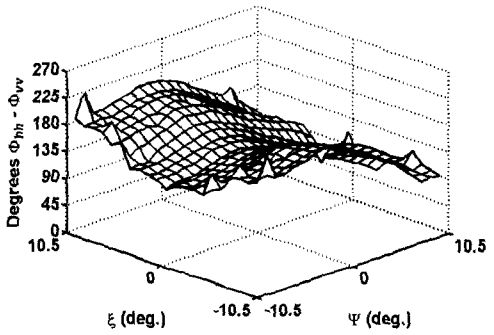

(a) Normalized $\sigma_{vv}$

(a) The normalized $\sigma_{vv}$



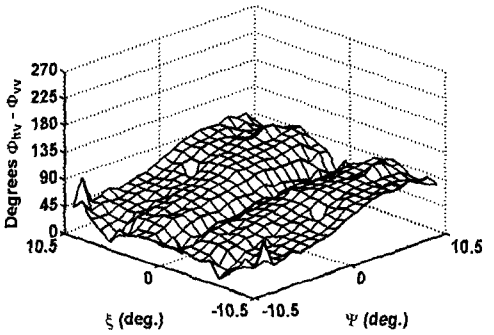

(b) Normalized $\sigma_{hv}$

(b) The normalized $\sigma_{hv}$




(c) 동일 편파 위상차

(c) The co-polarized phase-difference




(d) 교차 편파 위상차

(d) The cross-polarized phase-difference

그림 4. C-band scatterometer의 주 빔 내에서 측정한 구의 편파 응답

Fig. 4. C-band polarimetric responses of a sphere.

표 2. 산란계수 비교

Table 2. Comparison of backscattering coefficients.

| 구분 | 입사각 | VV | | HV | | 차이 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Scatt | SAR. | Scatt | SAR. | |
| 맨땅 | 40° | -8.0 | -9.3 | -18.3 | -16.7 | 1 |
| 논 | 50° | -12.9 | -11.2 | -18.7 | -17.9 | 1 |
| | 60° | -14.3 | -9.8 | -20.8 | -18.2 | 2 |
| 잔디 | 50° | -12.5 | -13.6 | -20.9 | -20.6 | 1 |

있다. 이는 SAR 시스템과 지상 scatterometer 간의 산란계수 차이는 없지만, 위상의 차이는 크다는 것을 보여준다.

표 1과 2에서 보인 차이를 사용하여 JPL/AirSAR의 데이터를 교정하여 사용할 수 있다. 여러 지역의 표본을 선택하여 교정하면 전체 SAR 데이터를 교정한 값을 취할 수 있게 된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 calibration된 scatterometer를 이용하여 SAR 데이터를 보정하는 연구 결과를 보였다. 안테나 주 빔에 걸친 레이더 왜곡을 정의함으로써 정확한 미분형 Mueller 행렬을 구할 수 있었다. 또한 이를 통해 정확한 후방산란계수를 구할 수 있었다. 정확히 보정된 Scatterometer의 데이터를 사용하여 SAR 데이터의 보정도 수행 가능함을 보였다. 특히 기존의 SAR 시스템은 정확하게 위상을 보정해 주지 않기 때문에 fully-polarimetric하게 산란계수 크기와 위상변수를 동시에 보상한 지상의 scatterometer를 이용하여 SAR 시스템을 더욱 정확하게 보정할 수 있음을 보여 주었다.

## 참 고 문 헌

[1] K. Sarabandi, F. T. Ulaby, "A Convenient Technique For Polarimetric Calibration of Single-Antenna Radar Systems", *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 28, no. 6, Nov. 1990.

[2] K. Sarabandi, Y. Oh and F. T. Ulaby, "Measurement and Calibration of Differential Mueller Matrix of Distributed Targets", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, Dec. 1992.

[3] K. Sarabandi et al., "Cross-Calibration Experiment of JPL AIRSAR and Truck-Mounted Polarimetric Scatterometer", *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 32, no. 5, Sep. 1994.

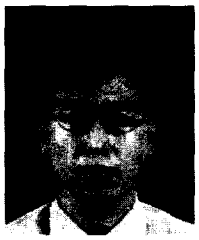
[4] K. Sarabandi, "Calibration of a Polarimetric Synthetic Aperture Radar using a Known Distributed Target", *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 32, May 1994.

[5] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Inc., 1990.

[6] 홍진영, "Ka-밴드 마이크로스트립 배열 안테나 설계", 홍익대학교 대학원 석사논문, pp. 41-46, Appendix, 2001년 10월.

[7] K. Sarabandi, "Derivation of Phase Statistics from the Mueller Matrix", *Radio Sci.*, vol. 27, Sep.~Oct. 1992.

정 구 준



2001년 8월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2002년 2월~현재: 홍익대학교 대학원 전파통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, SAR 영상 분석

홍 진 영

2000년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2002년 2월: 홍익대학교 대학원 전파통신공학과 (공학석사)
2003년 3월~현재: 홍익대학교 전파통신공학과 박사과정
[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사

오 이 석

1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
1988년 12월: 미국 University of Missouri-Rolla, 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
1993년 12월: 미국 University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학 및 컴퓨터과학과 (공학박사)
1994년 3월~현재: 홍익대학교 전파공학과 부교수
[주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나